

蒸散冷却建材による冷房負荷低減に関する研究

準会員 ○弘中甫英*1 正会員 小金井真*2 正会員 金 炫兌*3
 非会員 山下哲生*4 非会員 永橋和雄*5 非会員 常森喬紀*5

蒸散冷却建材 冷房負荷 非定常解析

1. はじめに

建設業界ではZEB(ゼロ・エネルギー・ビル)やZEH(ゼロ・エネルギー・ハウス)の普及推進、都市部におけるヒートアイランド対策の推進等の地球温暖化対策が講じられている。

ヒートアイランド対策の一つとして、ヒートアイランド緩和や省エネルギー等の効果が期待できる屋上緑化や高反射特性を有した遮熱塗料¹⁾が注目されている。しかし、それらの効果を維持する上で、適切な管理やメンテナンス等が必要であり、多額の維持管理費がかかることから普及が進んでいない。本状況下で、比較的維持費が安く、建物の冷房負荷削減や夏期における室内環境の改善等が期待できる蒸散冷却建材が新たに注目され始めている。

前年度の研究²⁾では、蒸散冷却建材の持つ省エネルギー効果について、実際の気象データを用いた定常解析による室内流入熱量を調べた。しかし、定常解析では壁体の熱容量による室内流入熱の時間遅れを考慮できていなかった。また、蒸散冷却建材の蒸散速度を定量的に評価できていなかった。

そこで、本研究では、蒸散冷却建材を実際の建物に施工した場合の室内流入熱量等を非定常解析によって評価するとともに、蒸散冷却建材の蒸散速度を実験によって調べた。

2. 蒸散冷却建材の概要²⁾

2.1 対象とする蒸散冷却建材の特徴

表1に研究対象の蒸散冷却建材の基本性能を示す。本研究で対象とする蒸散冷却建材は、「毛細管連続性」を有しており、水が下部から上部へ毛細管現象によって移動するため、効率的に建材表面に水を供給でき、蒸散冷却建材の表面を常に濡れている状態に保つことができる。その骨材は、珪藻土由来で平均直径が1~3[mm]である。

図1に対象の蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面を示す。この建材は、親水性の特殊バインダーで骨材同士が密接するように結合した板状の保水性不燃・蒸散促進層で断熱材が積層されたパネルと組み合わせて使用されている。

表1 蒸散冷却建材の基本性能

素材	【蒸散促進層】極細毛細管保水性セラミック粒結合板
密度[g/cm ³]	1.43 [g/cm ³]
重量[kg/m ²]	約 28.0[kg/m ²] (湿潤時) 約 19.3[kg/m ²] (乾燥時)
熱伝導率 [W/m・K]	【蒸散促進層】(乾燥時) 0.24[W/m・K]
保水性	【蒸散促進層】約 40 [%vol]
比熱[J/kg・K]	440[J/kg・K] (乾燥時) ※コンクリートの約 50%の比熱

2.2 蒸散冷却建材による除熱・冷却の原理²⁾

従来工法と蒸散冷却建材を施工した場合の除熱・冷却メカニズムを比較する。断熱をしていない建物では日射熱がスラブに浸入・蓄熱し、その熱が建物内に流入することにより室内の温度が上昇する。また、外断熱工法によって施工した建物では、断熱材によって熱の流入速度は低下するが、スラブへの日射熱の浸入・蓄熱は避けられず、いずれは熱が室内に流入する。

一方、蒸散冷却建材を施工した建物では、蒸散冷却建材内に保水した水が気化する際に、潜熱(気化熱)を奪うことにより屋上面・スラブの温度を下げて、室内への熱の貫流を抑え室内の温度上昇を抑えることができる。

つまり、断熱無しの場合及び一般外断熱工法を用いた場合には建物の躯体を冷やすことはできないが、蒸散冷却建材を用いると建物の躯体自体を冷却できることになる。よって、蒸散冷却建材を屋根面に設置することで、屋根面から室内への流入熱量を減らし、直下の空間の空調負荷を低減できると考えられる。

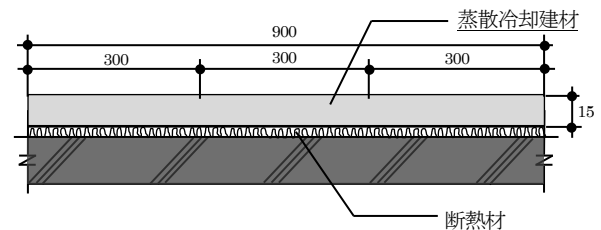


図1 蒸散冷却建材を施工した場合の屋上断面

3. 蒸散冷却建材による除熱・冷却に関する理論解析

3.1 理論解析の概要

本研究で対象とする蒸散冷却建材を実際の建物に施工した場合の屋根面からの室内流入熱量を定常・非定常解析によって、定量的に評価する。

前年度は定常解析によって、室内流入熱量を求め、評価した²⁾。本研究では非定常解析によって、室内流入熱量の経時変化を調べる。

3.2 一次元非定常熱伝導方程式

固体中において時間に対する温度変化は、非定常熱伝導方程式により表すことができる。i-1番目の位置の温度を t_{i-1} [°C]、i+1番目の位置の温度を t_{i+1} [°C]とすると、一次元非定常熱伝導方程式の差分法による近似解は、次の式(1)となる³⁾。

$$t'_i = \frac{1}{2} (t_{i-1} + t_{i+1}) \quad (1)$$

t_{i-1} [°C] と t_{i+1} [°C] の平均が、次の時間ステップにおける i 番目の位置の温度 t'_i [°C] となる。

ここで、固体中の分割間隔を Δy [m]、時間間隔を $\Delta \tau$ [s] とすると、式(2)に示す関係が成り立つ。

$$\frac{(\Delta y)^2}{\alpha \Delta \tau} = 2 \quad (2)$$

図2に境界条件を示す。垂直方向 (y方向) の熱の流れを考える。一次元非定常熱伝導における屋外側の蒸散冷却建材表面部(屋上面)を境界部1、材質が異なる2つの材料間を境界部2、屋内側の天井表面部を境界部3とする。なお、本解析において蒸散冷却建材内の温度分布は考慮していない(蒸散冷却建材外表面温度=裏面温度=屋根面温度)。

境界部1において、次の式(3)が成り立つ。

$$\alpha_s \cdot I = \alpha_0(\theta_s - \theta_a) + \beta \cdot \gamma \cdot kx(x_s - x_a) + \frac{\lambda_1}{\Delta y_1}(\theta_s - \theta_{s-1}) \quad (3)$$

式(3)は蒸散冷却建材表面での熱平衡式²⁾である。ここで、 β は蒸散冷却建材の水分蒸散効率を表す。蒸散効率とは、水面からの蒸散速度と比較した蒸散速度比のことである。

境界部2において、材料1と材料2の分割間隔をそれぞれ Δy_1 [m]、 Δy_2 [m]、熱伝導率をそれぞれ λ_1 [W/m·K]、 λ_2 [W/m·K] とすると、a領域からb領域へ流入する熱量 q_{ab} [W] は次の式(4)となる。

$$q_{ab} = \frac{\lambda_1 \Delta x z}{\Delta y_1} (t_a - t_b) \quad (4)$$

同様にb領域からc領域へ流入する熱量 q_{bc} [W] は次の式(5)となる。

$$q_{bc} = \frac{\lambda_2 \Delta x z}{\Delta y_2} (t_b - t_c) \quad (5)$$

ここで z は奥行である。式(4)(5)の熱の流入が $\Delta \tau$ [s] 時間続いた場合のb領域(直方体 d,e,f,g)の蓄熱量 q_0 [J] は次の式(6)となる。

$$\begin{aligned} q_0 &= (q_{ab} - q_{bc}) \Delta \tau \\ &= \Delta x z \left\{ \frac{\lambda_1}{\Delta y_1} (t_a - t_b) - \frac{\lambda_2}{\Delta y_2} (t_b - t_c) \right\} \Delta \tau \quad (6) \end{aligned}$$

この熱量が与えられると、直方体 d,e,f,g の温度は $\Delta \tau$ [s] 時間の間に t_b [°C] から t'_b [°C] に変化する。ここで、容積比熱 ρc [J/m³·K] (密度 [kg/m³] × 比熱 [J/kg·K]) として材料1側の容積比熱 $\rho_1 c_1$ [J/m³·K]、材料2側の容積比熱 $\rho_2 c_2$ [J/m³·K] と表すと、蓄熱量 q_0 [J] は次の式(7)となる。

$$q_0 = \frac{\Delta x z}{2} (\Delta y_1 \rho_1 c_1 + \Delta y_2 \rho_2 c_2) (t'_b - t_b) \quad (7)$$

したがって、式(6)と式(7)を等しいと置くと、次の式(8)が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta x z \left\{ \frac{\lambda_1}{\Delta y_1} (t_a - t_b) - \frac{\lambda_2}{\Delta y_2} (t_b - t_c) \right\} \Delta \tau \\ = \frac{\Delta x z}{2} (\Delta y_1 \rho_1 c_1 + \Delta y_2 \rho_2 c_2) (t'_b - t_b) \quad (8) \end{aligned}$$

ここで、式(2)の条件を用いて、式(8)を整理すると、次の式(9)となる。

$$t'_b = \left(\frac{\lambda_1}{\Delta y_1} t_a + \frac{\lambda_2}{\Delta y_2} t_c \right) / \left(\frac{\lambda_1}{\Delta y_1} + \frac{\lambda_2}{\Delta y_2} \right) \quad (9)$$

境界部3において、エネルギーバランスを考えると、天井面表面温度 θ_{is} [°C] は次の式(10)で求められる^{4,5)}。

$$\theta_{is} = \frac{(\theta_r - \theta_{is+1}) \Delta y_2}{\frac{\lambda_2}{h} + \frac{\Delta y_2}{2}} + \theta_{is+1} \quad (10)$$

天井面から分割間隔 $-\Delta y_2/2$ [m] 離れた位置における温度 θ_{is-1} [°C] は、次の式(11)で表すことができる。 θ_{is-1} [°C] は、次の時間ステップの θ_{is+1} [°C] を求めるのに必要な温度である。

$$\theta_{is-1} = \frac{(\theta_r - \theta_{is+1})}{\frac{\lambda_2}{h} + \frac{\Delta y_2}{2}} \Delta y_2 + \theta_{is+1} \quad (11)$$

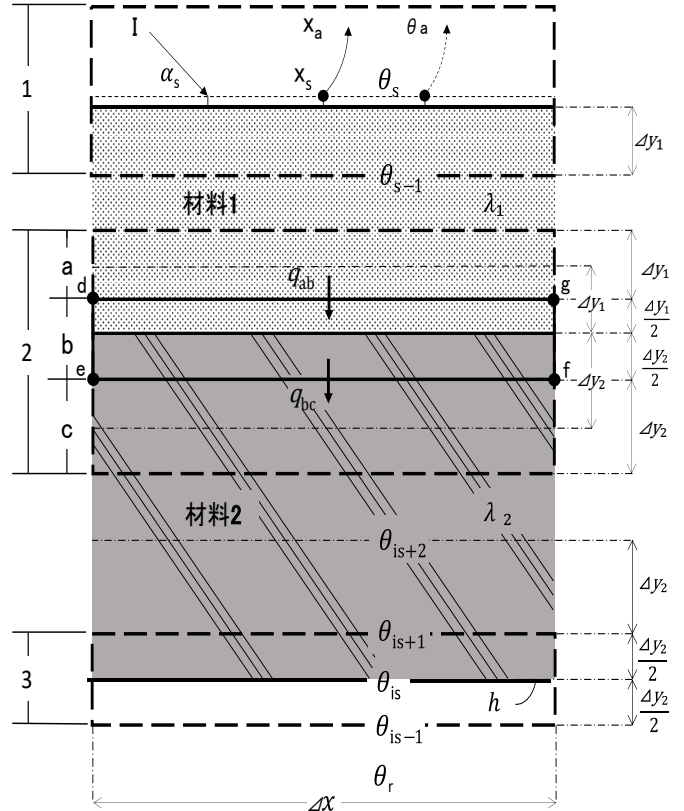


図2 蒸散冷却建材施工時の屋上スラブの境界条件

4. 非定常熱伝導解析による試算

4.1 試算概要

屋根面に蒸散冷却建材を設置した場合と設置しなかった場合の室内流入熱量を計算し、両者を比較した。

図3に計算対象建物の屋根面構造の模式図・仕様を示す。本計算ではA社技術研究所の屋根面構造に類似させた。表2に計算条件を示す。初期温度として蒸散冷却建材表面温度を外気温度、天井面温度を室温、その間の躯体温度は外気温度と室温で線形補間した温度を用いた。後述するが、ここでは蒸散冷却建材表面での熱平衡式(式(3))における気化熱項に乗ずる係数(蒸散効率)を $\beta=1$ とした。水の蒸発潜熱は $\gamma=2501$ [kJ/kg] とした。なお、屋上面に設置想定した蒸散冷却建材は厚さ15 [mm] で、含水時熱伝導率、比熱及び密度は、それぞれ約0.8 [W/m·K]、約2111 [J/kg·K] 及び約1.2 [g/cm³] である。

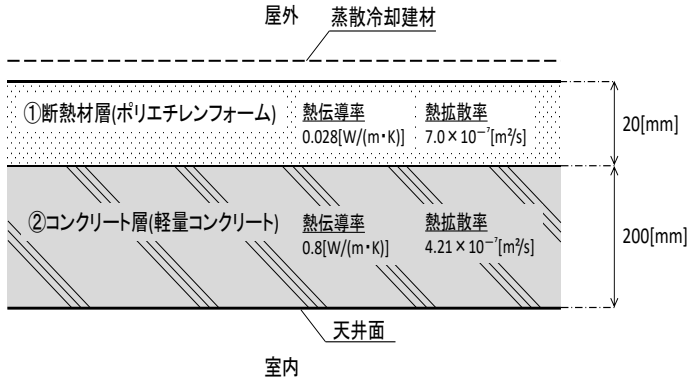


図3 屋根面構造の模式図・仕様

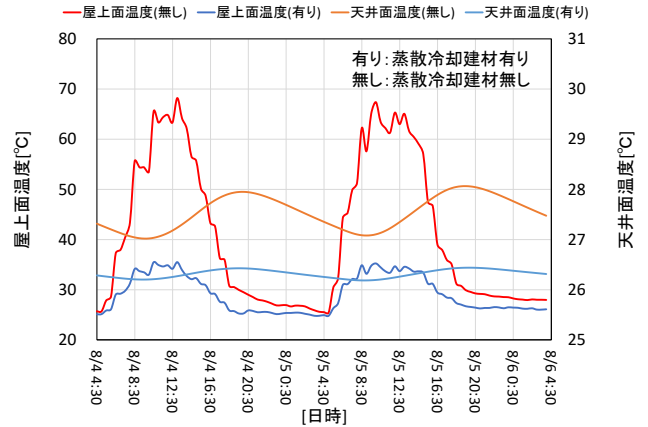


図4 屋根面温度及び天井面温度の経時変化

表2 計算条件

試算地点	東京
試算期間	2019/7/1～2019/8/31
使用気象データ	気温[°C]、相対湿度[%]、風速[m/s]、 全天日射量[MJ/(m ² ・h)]、気圧[hPa]
室内温度	26[°C] (固定値)
天井面熱伝達率	9[W/(m ² ・K)] (固定値)
屋上面日射吸収率	0.9 (固定値)
蒸散冷却建材の設置	有り時、無し時を選択
計算時間間隔	1[s]

※気象データはアメダス10分間値を利用(全天日射量は1時間値)

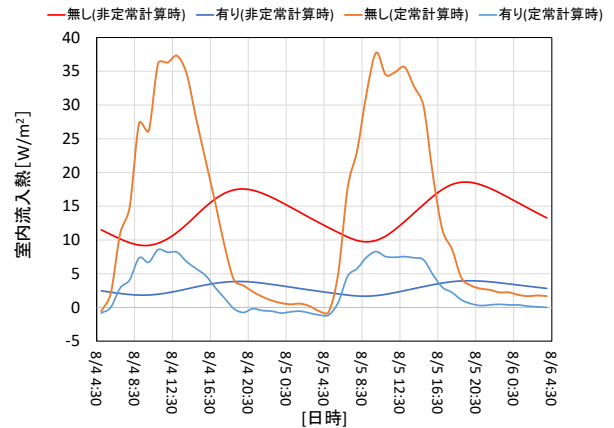


図5 定常計算時と非常計算時の室内流入熱の比較

4.2 試算結果

図4に試算期間内(8/4～8/6)の屋根面及び天井面の温度の経時変化を蒸散冷却建材の有無で示す。屋上面温度の最大値は、蒸散冷却建材を設置した場合に約35[°C]、設置しなかった場合に約68[°C]となり、両者に大きな差が出た。天井面温度の最大値は設置した場合に約26.4[°C]、設置しなかった場合に約28[°C]となった。

図5に定常計算時と非常計算時の室内流入熱の比較を示す。定常解析では、室内流入熱は正午前後に最大になっており、蒸散冷却建材を設置した場合に約8.5[W/m²]、設置しなかった場合に約37[W/m²]となった。一方、非常解析では19時頃に室内流入熱が最大になっており、蒸散冷却建材を設置した場合に約4[W/m²]、設置しなかった場合に約18[W/m²]となった。実際の室内への熱流入は非常状態となるため、非常解析の結果が実建物での熱流入状況に近くなると考えられる。本試算条件において、蒸散冷却建材を設置した場合と設置しなかった場合を比較すると、最大室内流入熱を約78%削減できた。全試算期間内(7～8月)における室内流入熱量の最大値は、蒸散冷却建材を設置した場合に4.7[W/m²](8/2/19:25)、設置しなかった場合に18.6[W/m²](8/5/19:09)となった。

図6に全試算期間内の定常計算時と非常計算時における日別の室内流入熱量[kJ/(m²・日)]を示す。図6より定常計算時と非常計算時の結果を比較すると、蒸散冷却建材を設置しなかった場合、室内流入熱量のばらつきが見られるが、設置した場合、両者は近い値となっていることが分かる。

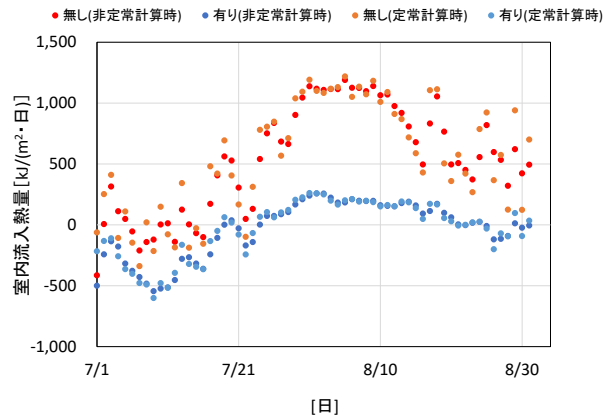


図6 定常計算時と非常計算時における日別の室内流入熱の比較

5. 蒸散量評価実験

5.1 実験概要

前年度の実験では、蒸散冷却建材の蒸散速度を水面からの蒸散速度と同等であると仮定していた。本実験では、蒸散冷却建材の蒸散速度を定量的に評価し、蒸散冷却建材表面での熱平衡式(式(3))における気化熱項に乗ずる係数(蒸散効率)βを調べた。実験方法として、水を含ませた蒸散冷却建材と容器に入れた水の蒸散量の経時変化を比較し、蒸散冷却建材の蒸散速度を調べることで、蒸散効率βを求めた。表3に実験条件を示す。

5.2 実験結果

図7に蒸散冷却建材からの蒸散量と水面からの蒸散量の経時変化の比較結果を示す。横軸は時刻、縦軸は1時間当たり1[m²]当たりの蒸散量を表す。図7より水を含ませた蒸散冷却建材と容器に入れた水の1時間当たりの蒸散量はほぼ同等であることが分かる。よって、本試算において蒸散冷却建材表面での熱平衡式(式(3))における気化熱項に乗ずる係数(蒸散効率) β は1とした。

表3 実験条件

実験場所	山口大学常盤キャンパス本館屋上(山口県宇部市)
実験日時	2020/10/26 12:15~16:15
気象データ (アメダス)	天気: 晴れ 平均気温: 19.5[°C] (宇部市) 平均風速: 2.5[m/s] (宇部市) 平均日射量: 495.3[W/m ²] (下関市)

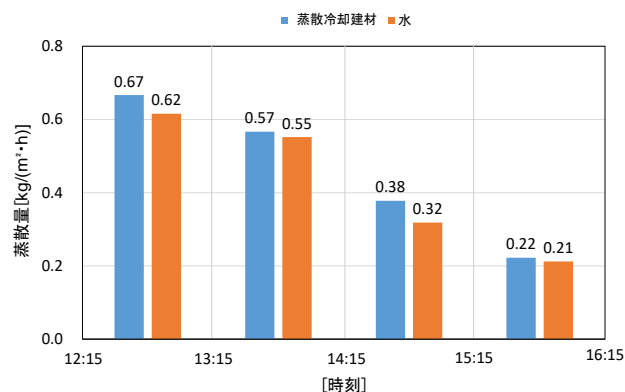


図7 蒸散冷却建材からの蒸散量と水面からの蒸散量の経時変化の比較

6. まとめ

蒸散冷却建材について、実際の建物に施工した場合を想定して夏期における2カ月間の気象データを与えて、非定常解析により室内流入熱量を調べ、前年度実施した定常解析の結果と比較した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 室内流入熱は定常解析で正午前後、非定常解析で19時頃に最大となり、壁体の熱容量による室内流入熱の時間遅れを確認できた。
- 2) 蒸散冷却建材を設置した場合には設置しなかった場合に比べて、最大室内流入熱を約78%削減できることが分かった。
- 3) 水を含ませた蒸散冷却建材の蒸散速度は、水面からの蒸散速度とほぼ同等であることが分かった。

今後、BESTなどの計算ソフトを用いて、年間を通したエネルギーシミュレーションを行い、建物用途や地域条件に応じた解析を行うことで、空調電力の削減をはかるための蒸散冷却建材の効率的な運用方法を検討していく予定である。

記号一覧

Δx	単位幅	m
Δy	分割間隔	m
Δy_1	材料1の分割間隔	m
Δy_2	材料2の分割間隔	m
z	奥行	m
θ_a	外気温度	°C
θ_s	蒸散冷却建材の表面温度	°C
θ_{s-1}	屋根面から $-\Delta y_1$ 離れた位置の温度	°C
θ_{is-1}	天井面から $-\Delta y_2/2$ 離れた位置の温度	°C
θ_{is}	天井面表面温度	°C
θ_{is+1}	天井面から $\Delta y_2/2$ 離れた位置の温度	°C
θ_{is+2}	天井面から $\Delta y_2/2 + \Delta y_2$ 離れた位置の温度	°C
θ_r	室温	°C
t'_i	$\Delta\tau$ 時間後の i 番目の位置の温度	°C
t_{i-1}	$i-1$ 番目の位置の温度	°C
t_{i+1}	$i+1$ 番目の位置の温度	°C
t_a	a 領域の温度	°C
t_b	b 領域の温度	°C
t_c	c 領域の温度	°C
t'_b	$\Delta\tau$ 時間後の b 領域の温度	°C
q_{ab}	a 領域から b 領域へ流入する熱量	W
q_{bc}	b 領域から c 領域へ流入する熱量	W
q_0	蓄熱量	J
$\Delta\tau$	時間間隔	s
a	温度伝導率(熱拡散率)	m ² /s
α_o	外表面熱伝達率	W/(m ² ·K)
h	天井面熱伝達率	W/(m ² ·K)
γ	水の蒸発潜熱	kJ/kg
β	蒸散効率	-
α_s	日射吸収率	-
x_a	外気の絶対湿度	kg/kg'
x_s	θ_s に対する飽和絶対湿度	kg/kg'
k_x	絶対湿度基準物質移動係数	kg/(m ² ·s)
I	日射量	W/m ²
λ_1, λ_2	材料1及び材料2での熱伝導率	W/(m·K)
ρ_1, ρ_2	材料1及び材料2での密度	kg/m ³
c_1, c_2	材料1及び材料2での比熱	J/kg·K

参考文献

- 1) 日本建築学会: クールーフガイドブック 都市を冷やす技術 初版、地人書館、pp.16-18 42-44
- 2) 小井塚咲花他: 蒸散建材による建物の除熱・冷却効果に関する研究、日本建築学会中国支部研究報告集(2020_3)
- 3) 萩三二: 新版 熱伝達の基礎と演習 改訂新版、東海大学出版部、pp.90-91
- 4) J. P. ホールマン: 伝熱工学 上 第1版、ブレイン図書出版株式会社、pp.117-118
- 5) 北山直方: 図解伝熱工学の学び方、オーム社、pp.68-70

謝辞

本研究は、令和元年度戦略的基盤技術高度化支援事業による助成を受け、山口県産業技術センター、海水化学工業㈱、山口大学の3者共同研究として実施したものである。ここに記して感謝の意を表します。

*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学生
*2 山口大学大学院創成科学研究科 教授
*3 山口大学大学院創成科学研究科 助教
*4 山口大学工学部技術部 技術専門職員
*5 海水化学工業株式会社

Stu., Dept. of Perceptual Sciences and Design Engineering, Yamaguchi Univ.
Prof., Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.
Assi. Prof., Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ.
Technical Staff, Technical Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ.
Kaisui Chemical Industry Co., Ltd.